



Ελληνικό Μεσογειακό Πανεπιστήμιο
Τμήμα Ηλεκτρολόγων Μηχανικών
Μοντελοποίηση & Έλεγχος Συστημάτων Ηλεκτροπαραγωγής

Παρουσίαση του λογισμικού PowerWorld

Οδηγίες για τον σχεδιασμό ΣΗΕ

Κωνσταντίνος Φιορέντζης

Διπλ. Ηλεκτρολόγος Μηχανικός & Μηχανικός Υπολογιστών

Ηράκλειο,

Οκτώβριος 2020

1 ΠΕΡΙΓΡΑΦΗ ΛΟΓΙΣΜΙΚΟΥ PowerWorld

Το λογισμικό PowerWorld αποτελεί ένα αρκετά εύχρηστο εκπαιδευτικό πρόγραμμα για την εκμάθηση και εξάσκηση σε ΣΗΕ, εξαιτίας της γραφικής παρουσίασης του υπό μελέτη συστήματος και των αποτελεσμάτων. Είναι ένα αλληλοδραστικό πακέτο προσομοίωσης που σχεδιάστηκε για την προσομοίωση της λειτουργίας ΣΗΕ σε χρονική περίοδο που κυμαίνεται από κάποια λεπτά σε αρκετές ώρες. Συγκεκριμένα, περιέχει ένα πακέτο ανάλυσης ροής φορτίου που μπορεί να προσομοιώσει συστήματα έως 100.000 ζυγών. Το γραφικό περιβάλλον περιλαμβάνει μονογραμμικά διαγράμματα, ενώ υπάρχει η δυνατότητα πανοραμικής λήψης και μεγέθυνσης συγκεκριμένων σημείων του συστήματος. Ακόμα, προσφέρει εργαλεία για τη βέλτιστη ροή ισχύος με περιορισμούς ασφαλείας, για τη διαθέσιμη ικανότητα μεταφοράς, και ένα εργαλείο για τον αυτόματο έλεγχο της παραγωγής.

Σε ό,τι αφορά τις δυνατότητες του προγράμματος αξίζει να αναφερθούν τα παρακάτω:

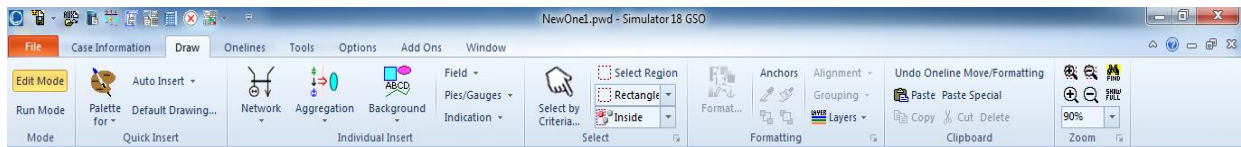
- Υποστηρίζει τη λεπτομερή μοντελοποίηση μετασχηματιστών με σύστημα αλλαγής τάσης υπό φορτίο και αλλαγής φάσης, διακοπών, καμπυλών ενεργού και αέργου ικανότητας φόρτισης γεννητριών, καμπυλών κόστους γεννητριών, προγραμμάτων φορτίων, προγραμμάτων ανταλλαγής ισχύος, γραμμών συνεχούς ρεύματος και απομακρυσμένου ελέγχου τάσης ζυγών.
- Είναι δυνατή η αξιολόγηση όχι μόνο των τεχνικών πτυχών μιας αλλαγής (π.χ. ανακατανομή φορτίου) αλλά και της οικονομικής σημασίας της αλλαγής.
- Ενσωματώνει τον αυτόματο έλεγχο παραγωγής περιοχής (Automatic Generation Control – AGC) στην επίλυση της ροής φορτίου, προσφέροντας τρεις διαφορετικούς τρόπους ελέγχου: με ένα ζυγό ταλάντωσης, διανεμημένο έλεγχο με πολλαπλούς ζυγούς ταλάντωσης (με χρήση των συντελεστών συμμετοχής των ζυγών) και οικονομική κατανομή φορτίου. Ταυτόχρονα, ο τύπος του ελέγχου AGC είναι δυνατόν να διαφέρει από περιοχή σε περιοχή (π.χ. δυνατότητα χρησιμοποίησης της οικονομικής κατανομής φορτίου σε εκείνες μόνο τις περιοχές όπου είναι γνωστές οι πληροφορίες για τις δαπάνες). Η χρήση του ελέγχου AGC καθιστά τη διαδικασία της επίλυσης σαφώς γρηγορότερη.
- Στη γραφική απεικόνιση του συστήματος και των ροών φορτίου, τα βέλη στις γραμμές, στα φορτία και στις γραμμές μεταφοράς είναι μεγαλύτερα και κινούνται ταχύτερα ανάλογα με το μέγεθος και την κατεύθυνση της ροής ισχύος. Παράλληλα, με την χρήση των pie charts (διαγράμματα πίτας), είναι άμεση η δυνατότητα ελέγχου των υπερφορτίσεων των γραμμών, καθώς η ροή φαίνεται ως ποσοστό της πλήρους φόρτισης της γραμμής.
- Το εξαιρετικά εύχρηστο γραφικό περιβάλλον βοηθά τόσο στην χρησιμοποίηση του ίδιου του προγράμματος, όσο και στην επεξεργασία και ερμηνεία των αποτελεσμάτων. Μέσα από τα μονογραμμικά διαγράμματα του προσομοιωτή και τους διαλόγους πληροφοριών καθίσταται δυνατή η δημιουργία και ο έλεγχος σωστής λειτουργίας ενός συστήματος γραφικά. Κατά τη λειτουργία edit mode δημιουργείται ή τροποποιείται το σύστημα, και κατά τη λειτουργία run mode το σύστημα «τρέχει» και οπτικοποιούνται τα αποτελέσματα.

- Η αυτοματοποιημένη διαδικασία εισαγωγής στοιχείων (γεννητριών, γραμμών, Μ/Σ, φορτίων κλπ) έχει ως αποτέλεσμα την μεγάλη ταχύτητα δημιουργίας σχεδίων, ειδικά μετά από μικρή εμπειρία χρήσης του προγράμματος. Ταυτόχρονα, είναι δυνατή η λεπτομερής απεικόνιση και ανάλυση του συστήματος, και η εύκολη χρήση των λειτουργιών μεγέθυνσης.
- Οι διακόπτες σε οποιοδήποτε σημείο του συστήματος ανοίγουν ή κλείνουν με ένα απλό πάτημα, γεγονός το οποίο διευκολύνει ιδιαίτερα τη συνολική εποπτεία των αλλαγών ή προβλημάτων που προκαλούνται στο σύστημα με την απομόνωση ή επαναλειτουργία κλάδων ή υποσυστημάτων του συστήματος (κυρίως σε ό,τι αφορά στις γεννήτριες και στα φορτία).
- Παρέχονται εργαλεία για τον υπολογισμό ευαίσθητων σημείων. Για παράδειγμα, αυτά μπορεί να είναι οι παράγοντες διανομής μεταφοράς ισχύος, οι ευαισθησίες ροής στη γραμμή μεταφοράς, ή η ευαισθησία των απωλειών.
- Δίνεται η δυνατότητα παραγωγής ισοϋψών χαρτών, οι οποίοι παρέχουν πληροφορίες για την ποικιλομορφία των τάσεων, των φορτίων, των ευαισθησιών απωλειών και ροής, του οριακού κόστους.
- Περιέχονται εργαλεία ανάλυσης πιθανότητας διαταραχών που βοηθούν στην αναγνώριση προβλημάτων. Η ανάλυση πιθανότητας διαταραχών γίνεται με την εφαρμογή μιας πλήρους ροής φορτίου για κάθε πιθανότητα με αυξανόμενη ακρίβεια. Στη συνέχεια καταρτίζονται κατάλογοι ενδεχομένων και σχετικών παραβιάσεων και δίνεται η δυνατότητα της ευέλικτης επεξεργασίας των καταλόγων ώστε να ικανοποιούνται δεδομένα κριτήρια.
- Δίνεται, πέρα από τη δυνατότητα γραφικής αναπαράστασης, και η δυνατότητα παρουσίασης και επεξεργασίας των στοιχείων υπό μορφή πινάκων, σε λογιστικό φύλλο. Όπως θα δούμε στη συγκεκριμένη χρήση του προγράμματος, οι πίνακες, εκτός από τις δυνατότητες ταξινόμησης και αντιγραφής των στοιχείων, είναι εξαιρετικά χρήσιμο για τον έλεγχο των δεδομένων και τυχόν λαθών, που δεν είναι πάντα εύκολο να εντοπιστούν στη γραφική αναπαράσταση.
- Είναι δυνατή η αποθήκευση των εγγράφων σε μορφή HTML, και η εκτύπωση υψηλής ευκρίνειας διαγραμμάτων στον εκτυπωτή. Υποστηρίζεται τέλος μια γλώσσα προγραμματισμού που επιτρέπει την αυτοματοποίηση συχνών εργασιών και την οργάνωσή τους, ώστε να διευκολύνεται η παρουσίαση των αποτελεσμάτων.

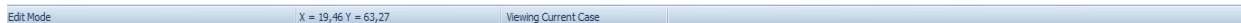
1.1 Εισαγωγή των στοιχείων

Ζυγός

Το κυριότερο στοιχείο ενός συστήματος μεταφοράς ηλεκτρικής ενέργειας είναι ο ζυγός. Οι ζυγοί χρησιμοποιούνται για να αποτυπώσουν σημεία συνδέσεων στους υποσταθμούς, όπου συνδέονται οι διάφορες συσκευές. Για την εισαγωγή ενός ζυγού, ακολουθούνται τα βήματα από το μενού Draw -> Network -> Bus, δημιουργώντας τον ζυγό της εικόνας 1.1.



1



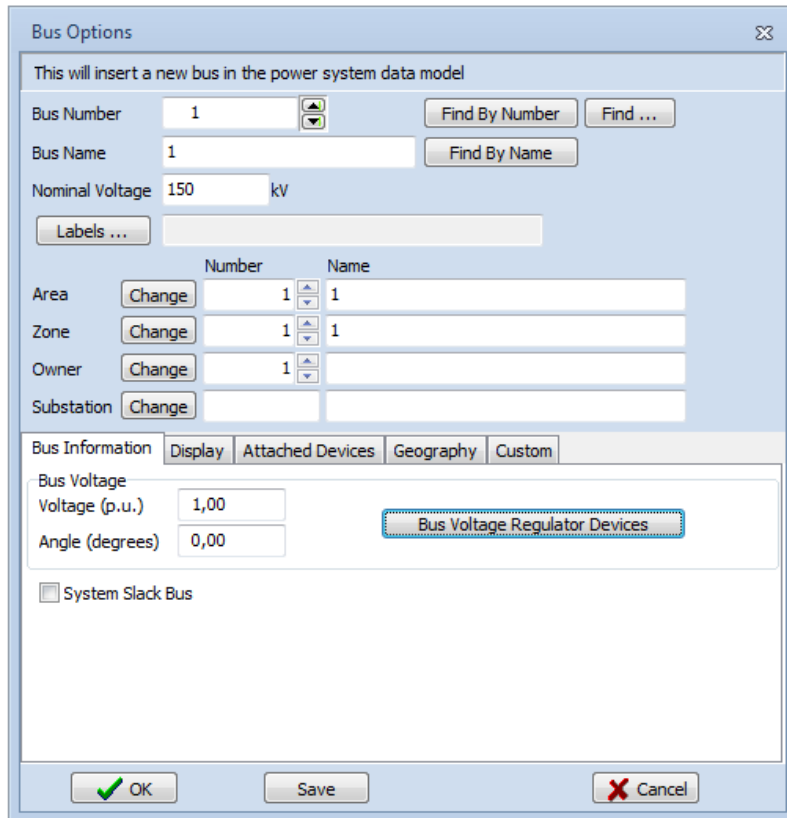
Εικόνα 1.1 Εισαγωγή ζυγού

Στην καρτέλα του ζυγού που εμφανίζεται (εικόνα 1.2) εισάγονται τα δεδομένα του ζυγού, τα κυριότερα από τα οποία είναι:

- Όνομα και αριθμός ζυγού
- Μορφή απεικόνισης στην επιλογή display (μέγεθος, πάχος, πλάτος κλπ)
- Ονομαστική τάση
- Πληροφορίες για το αν ο ζυγός αποτελεί ζυγό ταλάντωσης ή αναφοράς.

Ο ζυγός αναφοράς, ο οποίος είναι ζυγός παραγωγής, χρησιμεύει για να αντισταθμίσει τις, άγνωστες αρχικά, απώλειες του δικτύου και για την άμεση αντιμετώπιση των μεταβολών ισχύος. Σε αυτόν το ζυγό επιβάλλουμε σταθερή κατά μέτρο και γωνία τάση και προσδιορίζουμε τις ισχείς παραγωγής.

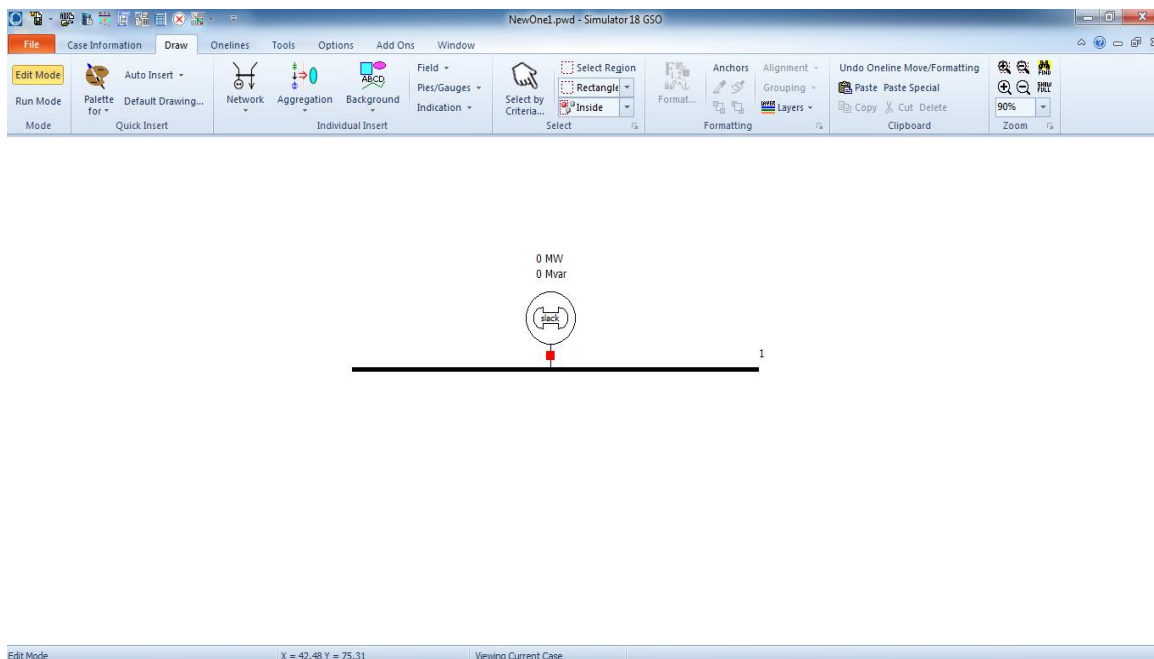
Είναι απαραίτητο τουλάχιστον ένας εκ των ζυγών του συστήματος να οριστεί ως ζυγός ταλάντωσης. Επιλέγοντας το στοιχείο System Slack Bus και ορίζοντας την τάση ως 1 pu και την γωνία 0 degrees, ο ζυγός αυτός είναι εκείνος που κρατάει την ισορροπία του συστήματος. Να σημειωθεί ότι είναι απαραίτητη και εισαγωγή γεννήτριας στο ζυγό αυτό.



Εικόνα 1.2 Καρτέλα επιλογών για ένα ζυγό

Γεννήτρια

Για την εισαγωγή γεννήτριας, αντίστοιχα με το ζυγό, γίνεται η επιλογή στο μενού Draw -> Network -> Generator και επιλέγεται ο ζυγός στον οποίο θα εισαχθεί η γεννήτρια (εικόνα 1.3).



Εικόνα 1.3 Εισαγωγή γεννήτριας

Στην καρτέλα εισαγωγής δεδομένων γεννήτριας (εικόνα 1.4) που εμφανίζεται εισάγονται τα στοιχεία της. Τα κυριότερα είναι:

- Τα όρια λειτουργίας της γεννήτριας (ελάχιστη/μέγιστη παραγωγή)
- Παραγωγή ενεργού ισχύος
- Αν η γεννήτρια χρησιμοποιείται από τον αυτόματο έλεγχο παραγωγής (AGC)
- Το πόσο γρήγορα αλλάζει η παραγωγή της γεννήτριας
- Αν έχει έλεγχο για τη διατήρηση σταθερής τάσης εξόδου (AVR)
- Τα όρια μέσα στα οποία μπορεί να παραλάβει ή να παράξει άεργο ισχύ
- Η μορφή απεικόνισης (στην επιλογή display)
- Ο ζυγός στον οποίο συνδέεται η γεννήτρια

Generator Options

Bus Number 1 Find By Number Status
Bus Name 1 Find By Name Open
ID 1 Find ... Closed Generator MVA Base
Area Name 1 Fuel Type Unknown 100,00
Unit Type UN (Unknown)

Display Information Power and Voltage Control Costs Fault Parameters Owner, Area, Zone, Sub Custom

Power Control
MW Output Available for AGC Part. Factor 10,00
Min. MW Output 0,000 Enforce MW Limits
Max. MW Output 1000,000

Voltage Control
Mvar Output 0,000 Regulated Bus Number 1
Min Mvars -9900,000 Available for AVR SetPoint Voltage 1,0000
Max Mvars 9900,000 Use Capability Curve Remote Reg % 100,0

Wind Control Mode
Mode None Power Factor 1,0000

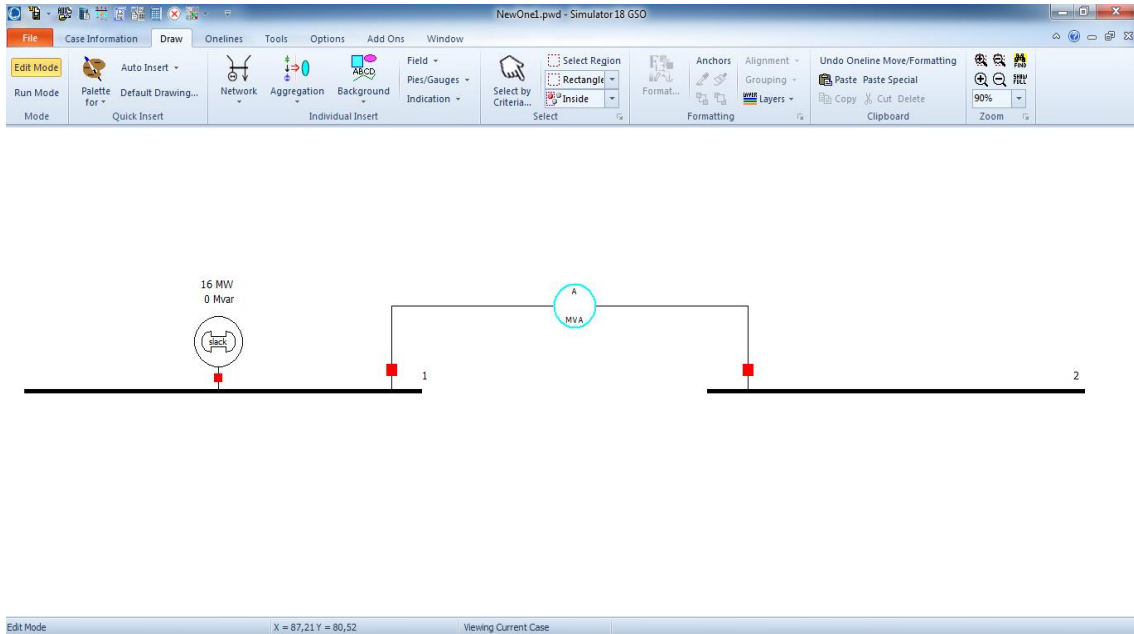
MW
Min Mvar
Max Mvar

OK Save Cancel Help

Εικόνα 1.4 Καρτέλα επιλογών για μια γεννήτρια

Γραμμή μεταφοράς

Η γραμμή μεταφοράς εναλλασσόμενου ρεύματος (AC) συνδέει δύο ζυγούς. Για την εισαγωγή της επιλέγεται Draw -> Network-> Transmission Line. Με το πρώτο κλικ γίνεται η επιλογή του ζυγού εκκίνησης και με το επόμενο του ζυγού στον οποίο καταλήγει. Η εικόνα 1.5, παρουσιάζει μια τυπική γραμμή μεταφοράς που συνδέει δύο ζυγούς.



Εικόνα 1.5 Εισαγωγή γραμμής μεταφοράς

Στην καρτέλα που εμφανίζεται μετά το τέλος της σχεδίασης, σύμφωνα με την εικόνα 1.6, εισάγονται τα δεδομένα της γραμμής, κυρίως τα εξής:

- Ωμική αντίσταση (R) (Per Unit)
- Επαγωγική αντίδραση (X) (Per Unit)
- Εγκάρσια χωρητικότητα (B) (Per Unit)
- Τα όρια της ροής ισχύος
- Τη μορφή απεικόνισης της γραμμής
- Δύο ζυγούς με τους οποίους συνδέεται η γραμμή
- Την κατάσταση της (Status -> Open, Closed)

Line	From Bus	To Bus	Circuit
Number	1	2	1
Name	1	2	
Area Name	1 (1)	1 (1)	
Nominal kV	150,0	150,0	

Per Unit Impedance Parameters	MVA Limits
Series Resistance (R)	Limit A
Series Reactance (X)	Limit B
Shunt Charging (B)	Limit C
Shunt Conductance (G)	Limit D
	Limit E
	Limit F
	Limit G
	Limit H
	Limit I

Εικόνα 1.6 Καρτέλα επιλογών για μια γραμμή μεταφοράς

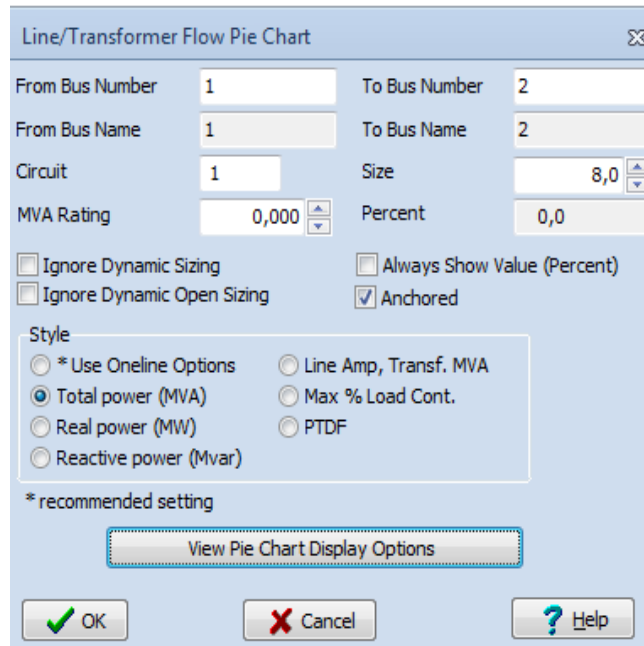
Πατώντας την επιλογή Calculate Impedances, ανοίγει ένα παράθυρο με περισσότερες επιλογές (εικόνα 1.7) για την εισαγωγή στοιχείων σχετικά με τις γραμμές μεταφοράς, όπως:

- Ωμική αντίσταση (R) (Ohms/km)
- Επαγωγική αντίδραση (X) (Ohms/km)
- Εγκάρσια χωρητικότητα (B) (Mhos/km)
- Km/miles
- MVA Limit

Εικόνα 1.7 Ορισμός των παραμέτρων μιας γραμμής μεταφοράς

Όπως φαίνεται από την εικόνα 1.5, μετά την τοποθέτηση της Γραμμής μεταφοράς, εμφανίζεται πάνω σε αυτήν ένα διάγραμμα (pie chart) το οποίο ουσιαστικά ενημερώνει τον χρήστη για την φόρτιση της γραμμής και τον προειδοποιεί όταν ξεπεράσει τα επιτρεπόμενα όρια. Πατώντας διπλό κλικ ανοίγει το μενού της εικόνας 1.8, με το οποίο ο χρήστης μπορεί να το χειριστεί, με τις κυριότερες επιλογές του να είναι:

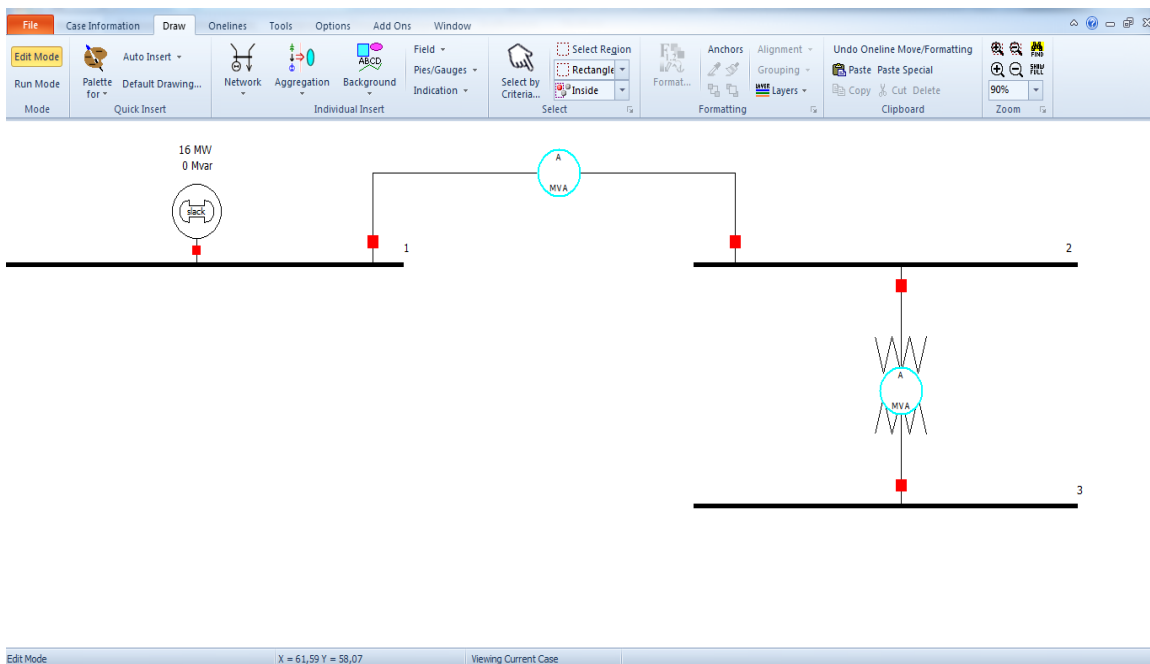
- Μέγεθος διαγράμματος
- Τον τρόπο απεικόνισης της φόρτισης της Γραμμής. (Ampere, MW, MVar, MVA, %)
- Το ποσοστό μετά το οποίο θα αλλάζει το χρώμα του διαγράμματος και θα προειδοποιεί τον χρήστη.



Εικόνα 1.8 Καρτέλα επιλογών, για το διάγραμμα "πίτας" μιας γραμμής μεταφοράς

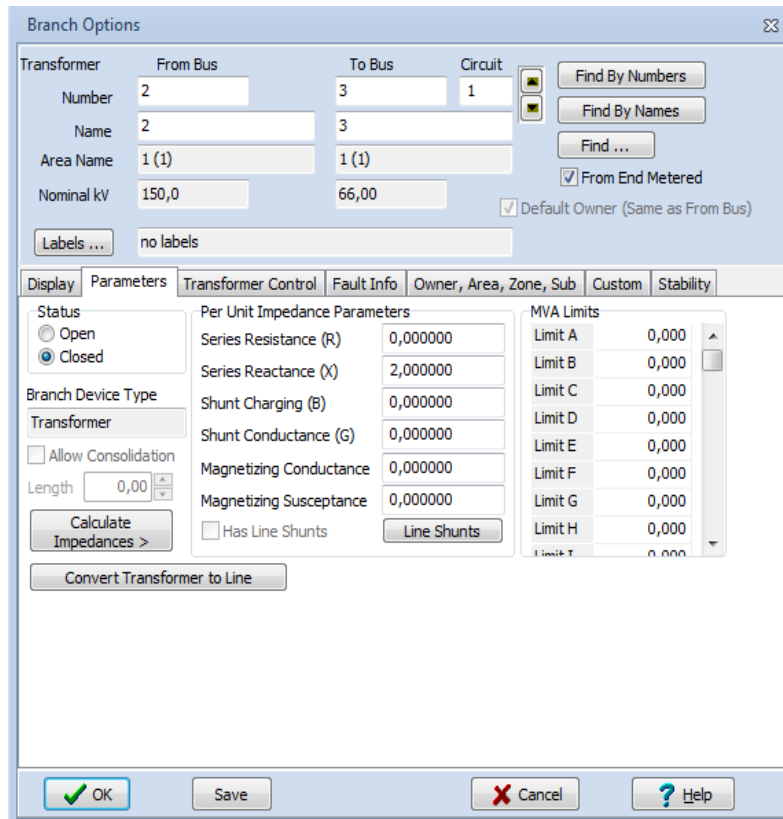
Μετασηματιστής

Όπως και η γραμμή μεταφοράς, έτσι και ο μετασηματιστής ενώνει δύο ζυγούς, όμως με διαφορετικά επίπεδα τάσης ο καθένας. Χρησιμοποιείται δηλαδή σε περιπτώσεις όπου γίνεται υποβιβασμός/ανόρθωση της τάσης. Η εισαγωγή του μετασηματιστή γίνεται από το μενού επιλέγοντας Draw -> Network -> Transformer, όπου με το πρώτο κλικ επιλέγεται ο ζυγός που συνδέεται το πρωτεύον του μετασηματιστή, και με το επόμενο ο ζυγός του δευτερεύοντος (εικόνα 1.9).



Εικόνα 1.9 Εισαγωγή μετασηματιστή

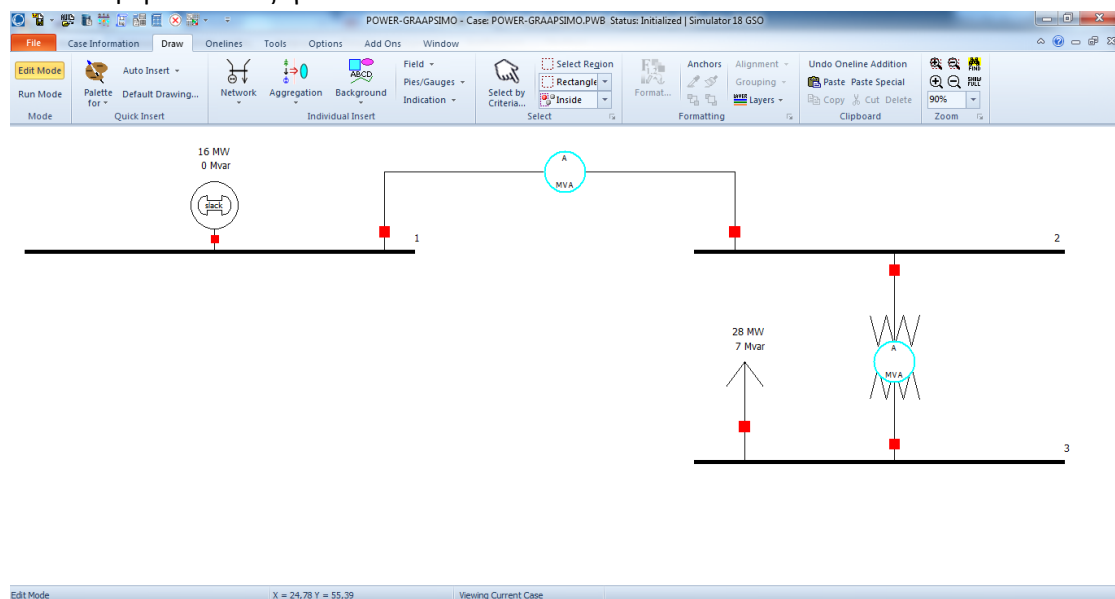
Τα στοιχεία που εισάγονται στην καρτέλα της εικόνας 1.10, είναι του ίδιου τύπου με εκείνα της γραμμής μεταφοράς:



Εικόνα 1.10 Καρτέλα επιλογών για ένα μετασχηματιστή

Φορτίο

Για το φορτίο ακολουθείται η διαδικασία: Draw -> Network -> Load και στη συνέχεια επιλέγεται ο ζυγός όπου θα τοποθετηθεί. Σύμφωνα με την εικόνα 1.11, έγινε εισαγωγή ενός τυπικού φορτίου στο ζυγό 3.



Εικόνα 1.11 Εισαγωγή φορτίου

Στο παράθυρο για τα δεδομένα του φορτίου (εικόνα 1.12), διακρίνονται τα ακόλουθα κυριότερα στοιχεία:

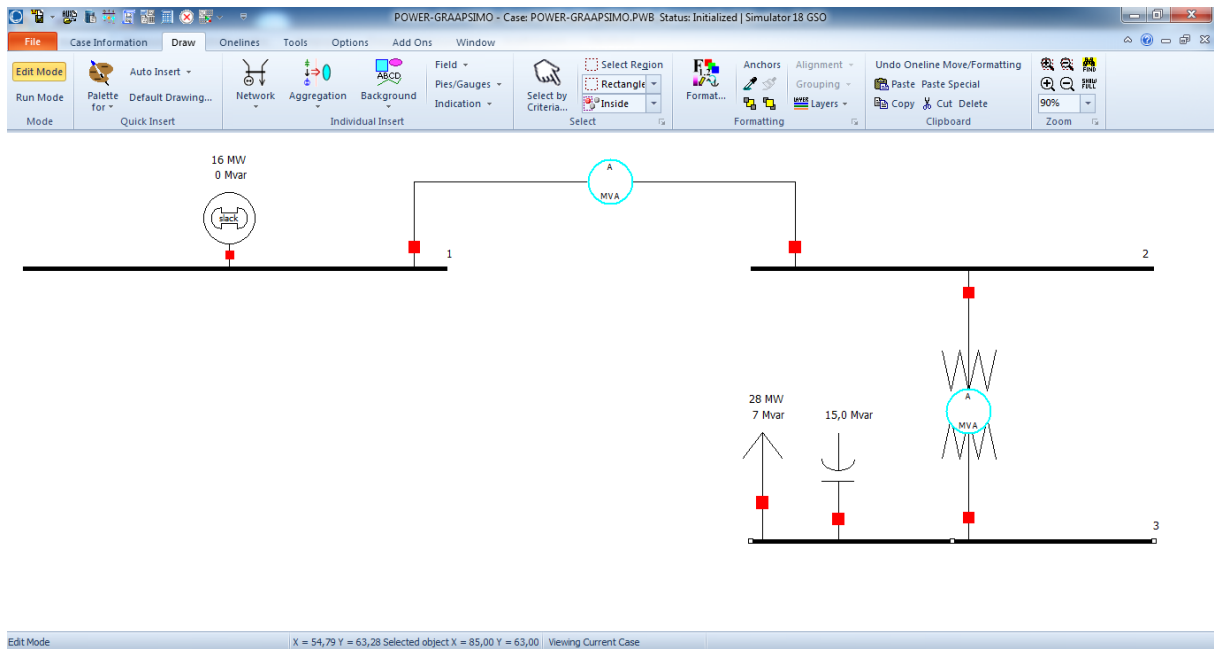
- Η κατάσταση του (Open, Closed)
- Ο ζυγός στον οποίο συνδέεται το φορτίο
- Η ενεργός και άεργος ισχύς του
- Η σύνθετη αντίστασή του
- Η ένταση του ρεύματος
- Στοιχεία για την απεικόνιση του

The screenshot shows the 'Load Options' dialog box. It is divided into several sections. The top section contains search fields for 'Bus Number' (3), 'Bus Name' (3), and 'ID' (1), with corresponding 'Find' buttons. A 'Status' section has radio buttons for 'Open' and 'Closed', with 'Closed' selected. Below this is a 'Labels ...' button. The next section has fields for 'Area', 'Zone', 'Substation', and 'Owner', each with a 'Change' button and a value of 1. A checkbox 'Same Owner as Terminal Bus' is checked. The 'Load Information' section has tabs for 'OPF Load Dispatch' and 'Custom'. It contains three columns: 'Constant Power' with 'MW Value' (27,9) and 'Mvar Value' (7), 'Constant Current' with '0,000', and 'Constant Impedance' with '0,000'. The 'Display Information' section has 'Display Size' (10,00), 'Scale Width with Size' checked, 'Display Width' (3,75), and 'Pixel Thickness' (1). An 'Orientation' section has radio buttons for 'Right', 'Left', 'Up' (selected), and 'Down'. There is also a 'Link To New Load' button. At the bottom are 'OK', 'Save', 'Cancel', and 'Help' buttons.

Εικόνα 1.12 Καρτέλα επιλογών για ένα φορτίο

Εγκάρσιο άεργο στοιχείο

Αντιπροσωπεύουν ουσιαστικά τα στοιχεία αντιστάθμισης που τοποθετούνται σε ένα ΣΗΕ, για την παραγωγή (πυκνωτές) ή την απορρόφηση (επαγωγικές αντιδράσεις- πηνία) αέργου ισχύος. Συνήθως οι συσκευές αυτές αποτελούνται από συστοιχίες κλιμακούμενης σύνθετης αγωγιμότητας που συνδέονται στο σύστημα με διακριτά βήματα, και οι συσκευές θεωρούνται ενεργές αν έστω και ένα από τα μπλοκ αυτά είναι συνδεδεμένο στο σύστημα. Αντίστοιχα με τα προηγούμενα, ακολουθείται η διαδικασία Draw -> Network -> Switched Shunt επιλέγοντας το στο ζυγό που επιθυμούμε να εγκατασταθεί. Η εγκατάσταση του πραγματοποιήθηκε στο ζυγό 3, όπως απεικονίζει η εικόνα 1.13.



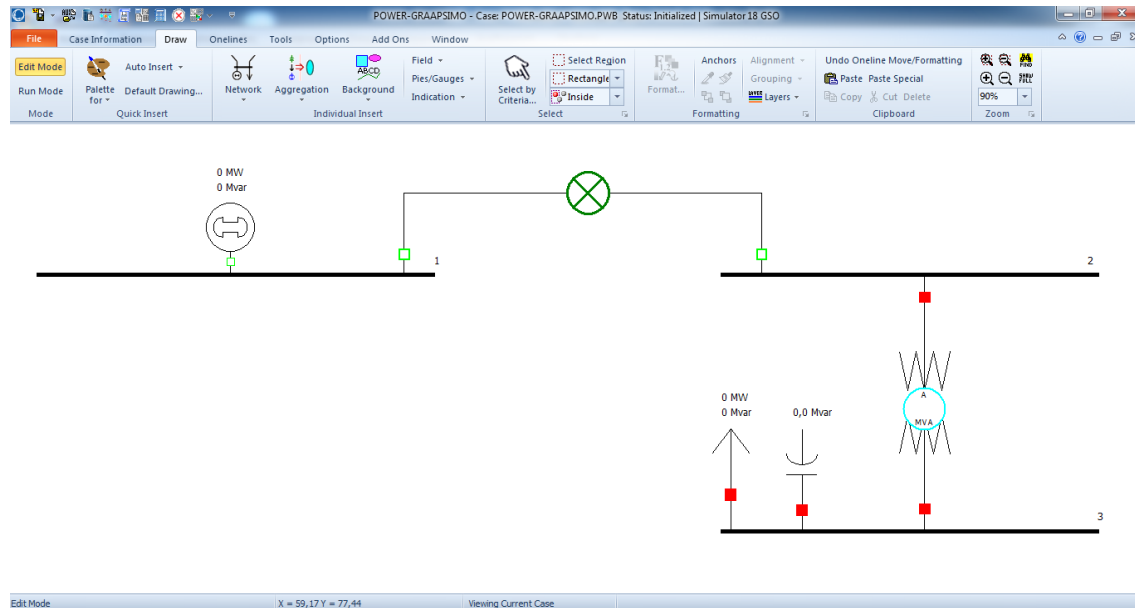
Εικόνα 1.13 Εισαγωγή εγκάρσιου άεργου στοιχείου

Στο παράθυρο των στοιχείων (εικόνα 1.14) του Switched Shunt εισάγονται:

- Ο ζυγός που ανήκει
- τα στοιχεία απεικόνισης του
- Η τιμή της άεργου ισχύος που παράγει ή καταναλώνει
- Ο τύπος του (fixed, discrete, continuous, Bus shunt)
- Η κατάσταση του (Open, Closed)

Εικόνα 1.14 Καρτέλα επιλογών για ένα εγκάρσιο άεργο στοιχείο

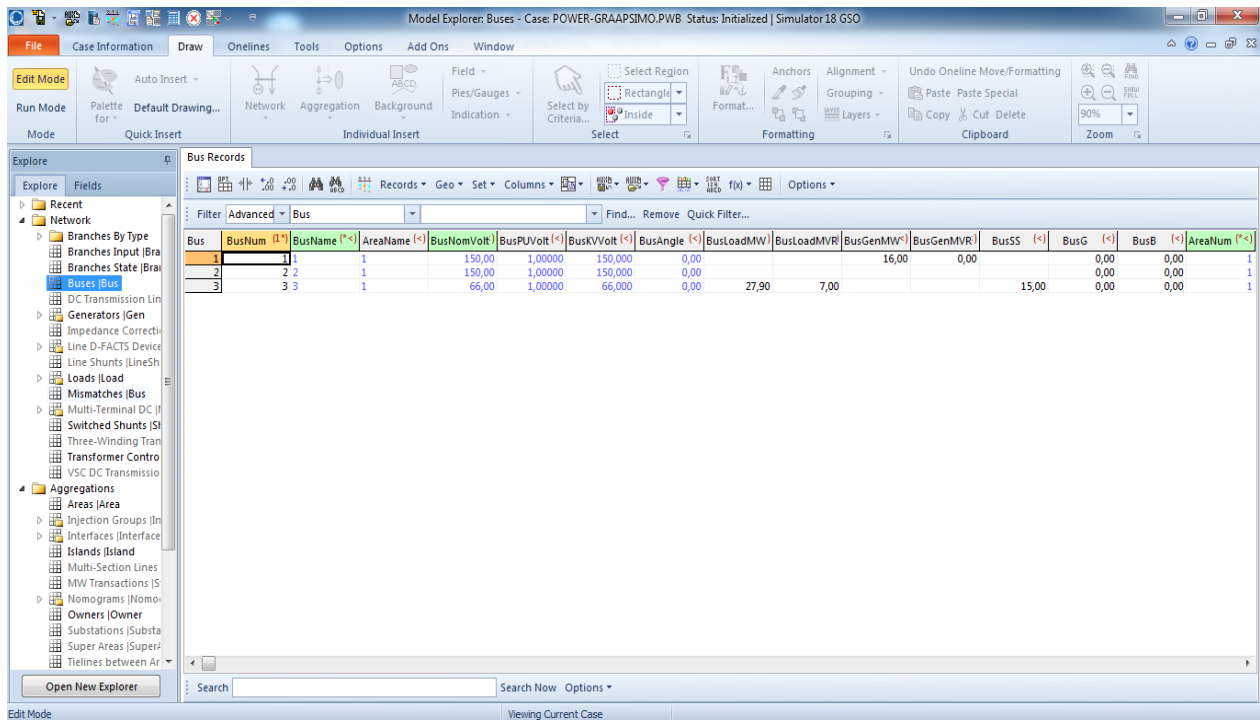
Αξίζει να σημειωθεί ότι τα κόκκινα τετραγωνάκια που διακρίνονται κατά μήκος όλου του συστήματος αποτελούν διακόπτες ισχύος. Όταν έχουν κόκκινο χρώμα σημαίνει ότι είναι κλειστοί (σε λειτουργία) ενώ όταν είναι με πράσινο περίγραμμα είναι ανοιχτοί (εκτός λειτουργίας). Κάθε στοιχείο διαθέτει ένα διακόπτη, οπότε όταν ο χρήστης θέτει εκτός λειτουργίας ένα στοιχείο του συστήματος (από το Status του όπως αναφέρθηκε παράπάνω) ανοίγει ουσιαστικά τον διακόπτη. Στην εικόνα 1.15 διακρίνεται το σύστημα που έχει δημιουργηθεί από την αρχή της περιγραφής, με το φορτίου του ζυγού 1 και τη γραμμή μεταφοράς που ενώνει τους ζυγούς 1 και 2 εκτός λειτουργίας.



Εικόνα 1.15 Παρουσίαση διακοπών



1.2 Παρουσίαση εργαλείου “Case Information”

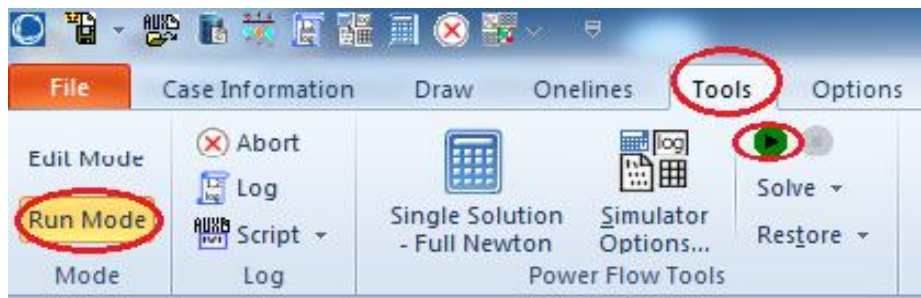
Τελειώνοντας με την παρουσίαση των οδηγιών εισαγωγής των σημαντικότερων στοιχείων ενός ΣΗΕ, στο PowerWorld είναι ιδιαίτερα χρήσιμο να παρουσιαστούν και οι δυνατότητες που παρέχει το εργαλείο Case Information που είναι ενσωματωμένο στο πρόγραμμα. Διαθέτει συγκεντρωμένα όλα τα στοιχεία του συστήματος που έχει δημιουργήσει ο χρήστης σε πίνακες, χωρισμένα σε κατηγορίες (Buses, Generators, Lines, Loads, Switched Shunts κ.α). Οπότε ο χρήστης μπορεί εύκολα να συλλέξει αλλά ακόμα και να εισάγει δεδομένα στο Σύστημα που πρόκειται να προσομοιώσει. Ακολουθεί η εικόνα 1.16, με μια τυπική απεικόνιση του Case Information όπου αριστερά φαίνεται το Toolbar με τις κατηγορίες ανάλογα με τα στοιχεία του συστήματος.



Εικόνα 1.16 Εισαγωγή στο περιβάλλον του Case Information

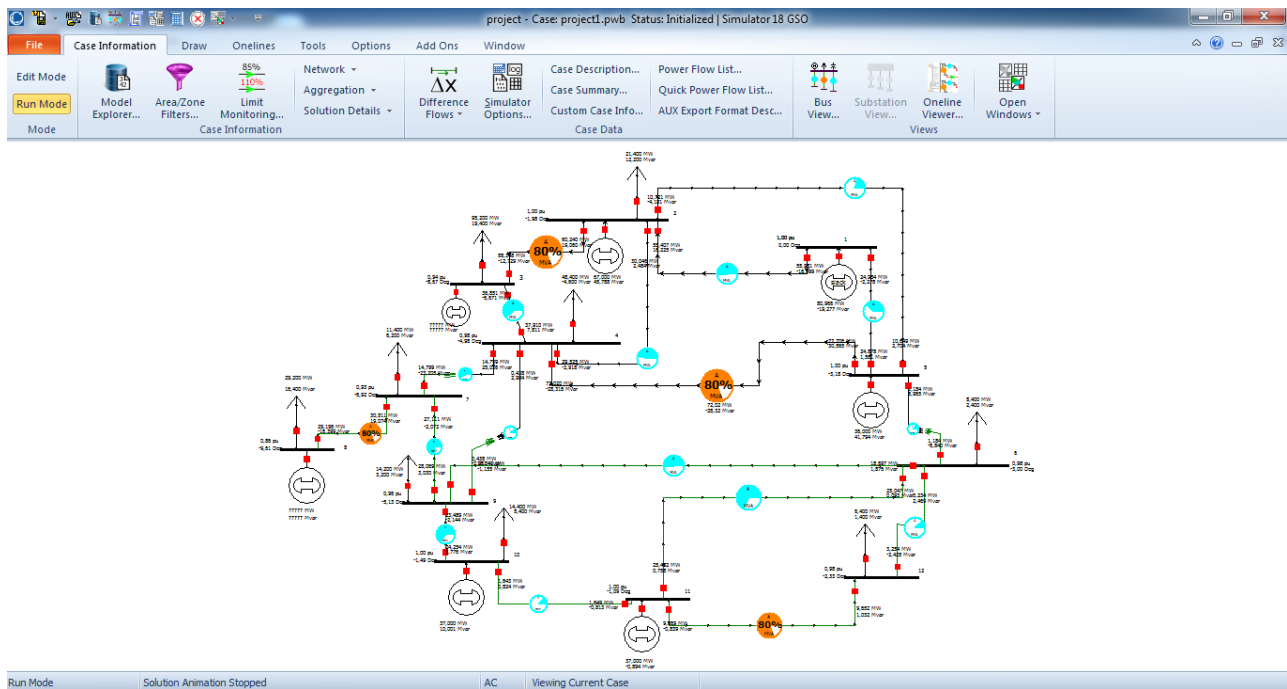
1.3 Παρουσίαση εργαλείου “Run Mode”

Πρόκειται για το εργαλείο που τρέχει την προσομοίωση για την εξαγωγή των αποτελεσμάτων. Επιλέγοντας από το κεντρικό toolbar του προγράμματος **Run Mode** -> **Tools** -> (ε ) (ε ) επιτυγχάνεται το τρέξιμο της προσομοίωσης.



Εικόνα 1.17 Οδηγίες μετάβασης στο εργαλείο Run Mode

Η εικόνα 1.18 παρουσιάζει ένα πιο σύνθετο σύστημα σε Run Mode:



Εικόνα 1.18 "Τρέξιμο" ενός πιο σύνθετου συστήματος

Τα αποτελέσματα που προκύπτουν απεικονίζονται στην κεντρική σελίδα του προγράμματος (φορτίσεις γραμμών, παραγωγή γεννητριών) ή στο Case Information όπως αναφέρθηκε παραπάνω.